

塩害劣化を受けたコンクリート構造物の耐震性能を考慮した補修時期に関する一考察

香川大学大学院 学生会員 ○牧野 誠太郎
 香川大学工学部 正会員 松島 学
 四国総合研究所 正会員 横田 優

1. はじめに

近年、塩害を受けたコンクリート構造物の劣化が顕在化し、社会資本の維持管理の問題が注目されている。本研究は、劣化したコンクリート構造物の耐震性能の評価を目的としている。塩害劣化により鉄筋の腐食が進行し、構造部材のじん性も低下し、地震時の等価な静的耐力が低下する。本研究では、塩害によるじん性率および耐荷力の低下と鉄筋の腐食量の関係を考えた劣化進行モデルを開発した。実構造物を対象に、各劣化因子のばらつきをモデル化するために信頼性理論を適用した。入力する地震動は、レベルⅡの大きな地震動を対象として、構造物の重要度などを考慮した最適補修時期を求めた。

2. 地震動の確率モデル

対象とする地震動は、道路橋示方書の水平震度 $K_h=0.6$ を下限値と設定した。構造物の耐用期間を 50 年と設定したことより、Vision2000 の性能マトリックスから再現期間は 475 年となる。従って、超過確率は、式(1)で求められる。

$$P_E = 1 - \left(1 - \frac{1}{475}\right)^{50} = 0.1 \quad (1)$$

地震動の最大加速度分布を対数正規分布と仮定し、既往の研究より変動係数 $\delta=0.3$ とした。これより、対象とする地震加速度の平均値 $\mu=427.5\text{gal}$ 、標準偏差 $\sigma=128.3\text{gal}$ が求められる。

3. 塩害劣化モデル

(1) 腐食減量のモデル

塩害による劣化の過程は潜伏期、進展期、加速期の三つに区分される。潜伏期では鉄筋は腐食せず、塩化物イオンがコンクリートを浸透し、鉄筋付近に蓄積されていく。進展期では鉄筋の腐食をはじめ、鉄筋の腐食が進むとかぶりコンクリートにひび割れが発生して加速期になる。加速期では進展期と比べて数倍の速度で腐食が進み、それに伴って RC 部材の耐荷力が低下する。

腐食開始時間 t_r を求めるために Fick の拡散方程式を用いる。鉄筋付近の塩化物イオン量が限界塩化物イオン量を超えた時間が腐食開始時間 t_r となる。

鉄筋の腐食が進行すると、腐食生成物の膨張圧により鉄筋に沿ってコンクリート部にひび割れが生じる。ひび割れ発生時に生じる応力をまだ腐食していない鉄筋、腐食生成物、コンクリート部とに分けて考えると図-1 のように仮定できる。図中のかぶりコンクリートに生じる応力 q_1 によりかぶりコンクリートにひび割れが生じると仮定した。腐食生成物の膨張によってコンクリートに発生する引張応力が、コンクリートの引張強度を超えると腐食ひび割れが発生すると考える。

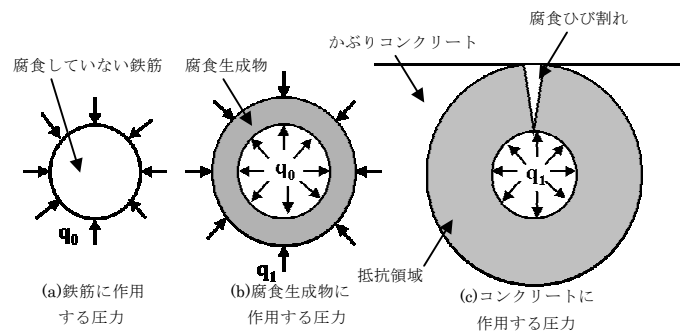


図-1 ひび割れの発生モデル

(2) 部材のじん性低下モデル

鉄筋の腐食によりコンクリートに膨張圧がかかりコンクリートにひび割れが発生する。ひび割れにより付着耐力が低下することで、部材のじん性率が低下する。じん性率の低下は式(2)のような指数関数モデルで仮定した。

$$\mu(t) = \mu_0 e^{-\lambda(t-t_r)} \quad \text{when } t_r \leq t \quad (2)$$

ここで、 $\mu(t)$ は経過年数 t 年でのじん性率、 μ_0 は初期じん性率で表-1 に示すばらつきを考えた。 λ は低下係数、 t_r は鉄筋の腐食開始時間である。 λ は鉄筋腐食によるじん性率低下のばらつきを考慮し、平均値 0.03、変動係数 0.5 の対数正規分布を仮定した。

エネルギー一定則より地震時の等価な静的耐力 P_s は式(3)で求められる。

$$P_s = P_y \sqrt{2\mu(t) - 1} \quad (3)$$

ここで、 P_y は降伏耐力である。

4. 性能関数

破壊確率を求めるためにモンテカルロシミュレーションを用い、計算回数は 10000 回とした。

構造物の安全性は式(4)の性能関数で表される。

$$Z = P_s - P_w \quad (4)$$

ここで、 P_s は地震時の等価な静的耐力、 P_w は地震による外力である。この性能関数 Z が0を下回ると破壊となる。確率変量とした因子の一覧を表-1にまとめて示す。

因子	平均値	標準偏差	分布形状
拡散係数 $D_c(\text{cm}^2/\text{sec})$	1.73×10^{-8}	1.59×10^{-8}	L
限界塩化物イオン量 $C_{\text{max}}(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.1	0.058	R
かぶりの誤差 $X_a(\text{cm})$	0.35	0.52	L
コンクリートの引張強度 $f_c(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	30.0	3.0	L
進展期の腐食速度 $ds1(\%/year)$	0.05	0.025	L
加速期の腐食速度 $ds2(\%/year)$	0.35	0.175	L
初期じん性率 u_0	5.42	1.1	L
じん性の低下に関する係数 λ	0.03	0.015	L
入力加速度 $a_c(\text{gal})$	472.5	128.3	L

分布形状 L: 対数正規分布, R: 一様分布

表-1 確率変量とした因子

5. 期待費用最少のモデル

経過時間 t 年までに得られる構造物の便益 C_B から期待損失費用 C_L を除いた値を総期待便益 C_T とした。 C_T が最大となる t 年で補修すれば、総期待便益が最大となる。

t 年における構造物の便益 $C_{By}(t)$ は式(5)のように表される。

$$C_{By}(t) = a(t) \cdot C_c \cdot C(t) = a_0 \cdot e^{-dt} \cdot C_c \cdot \frac{1}{(1+k)^t} \quad (5)$$

ここで、 $a(t)$ は構造物の償還年数により定まる係数で、利益率の低下を表す。 a_0 は初期償還年数、50年後には利益率が50%になると仮定して $d=0.014$ と設定した。 C_c は建設費である。 $C(t)$ は建設時の費用に割りもどすための係数で、 k は利率で0.03と設定した。よって、構造物が t 年までに得る便益 C_B は式(6)のようになる。

$$C_B = \sum_{t=1}^n C_{By}(t) \quad (6)$$

破壊時の損失費用を C_{Ly} とすると、 t 年での破壊による期待損失費用 C_L は、 t 年での破壊確率 $P_f(t)$ を乗じることで式(7)のように表される。

$$C_L = P_f(t) \cdot C_{Ly} = P_f(t) \cdot b \cdot C_c \quad (7)$$

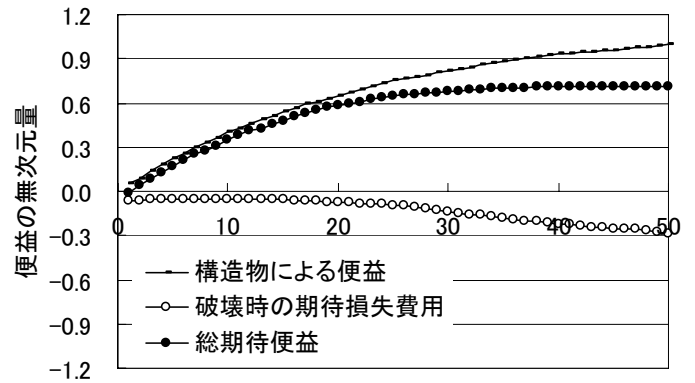
ここで、 b は被害係数で、構造物が地震により崩壊した時に受ける損失費用であり、構造物の重要度、社会的な損失費用なども含まれる。

したがって、総期待便益 C_T は式(8)で表される。

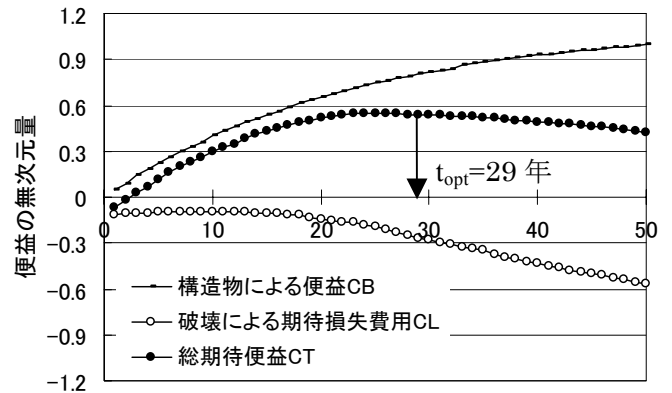
$$C_T = C_B - C_L = \sum_{t=1}^n \left(a_0 \cdot e^{-dt} \cdot C_c \cdot \frac{1}{(1+k)^t} \right) - P_f(t) \cdot b \cdot C_c \quad (8)$$

構造物の被害係数 $b=10,20,50$ と変化させて求めた

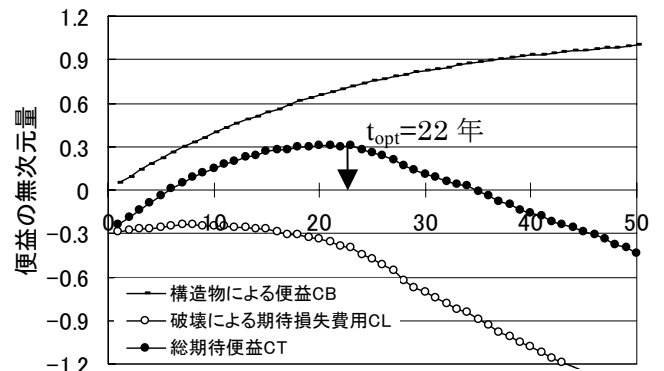
最適補修時期を図-2(a),(b),(c)に示す。経過年数 t が進むと、構造物の利益率が低下する。破壊確率 P_f の上昇により、破壊時の期待損失費用 C_L が増加する。総期待便益 C_T が最大となる経過年数 t が最適補修時期 t_{opt} となる。 $b=10$ では供用期間中に t_{opt} が見られないが、この場合では補修をせずに使用を続けた方が良くと判断できる。被害係数 b が増加することで、最適補修時期 t_{opt} が早くなり、 $b=20$ で $t_{\text{opt}}=29$ 年が、 $b=50$ では $t_{\text{opt}}=22$ 年が最適補修時期となる。重要な構造物は早期の補修が必要だが、重要度の低い構造物は補修を先延ばしにしてもよいことが読み取れる。



(a) $b=10$ の場合



(b) $b=20$ の場合



(c) $b=50$ の場合

図-2 最適補修時期の算定